

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413482

基于 Sampson 距离参数估计的光纤水听器弱信号解调方法*

梁楸岷^{1,2}, 王敏^{2,3}, 杨平^{2,3}, 王文侠², 郑慧峰¹

(1. 中国计量大学计量测试与仪器学院 杭州 310018; 2. 中国计量科学研究院 北京 100029;
3. 先进溯源技术创新中心 北京 102200)

摘要:基于 3×3 耦合器的干涉型光纤水听器在海洋目标监测中已经进入工程化应用阶段,其相移信号解调通常采用基于最小二乘法的椭圆拟合对干涉信号进行参数估计,以消除非理想 3×3 耦合器引起的解调结果偏差问题。然而,当光纤水听器接收信号较弱,通过干涉仪产生的相移较小时,干涉信号形成的李萨如图椭圆不完整,最小二乘法的高曲率偏差问题会导致拟合解调的相移信号结果出现较大偏差。此外,尽管正交距离拟合方法可以有效拟合不完整椭圆,但其计算复杂且耗时较长,不利于实现实时解调。针对上述问题,提出了一种基于 Sampson 距离参数估计的光纤水听器弱信号解调方法。通过 Sampson 距离拟合 3×3 耦合器光纤水听器接收弱信号时形成的不完整李萨如图椭圆,能够准确拟合估计光纤水听器输出干涉信号参数,不仅提高了解调精度,还显著提升了计算效率,优于正交距离拟合方法。通过数值仿真对比分析了 Sampson 距离与最小二乘法、正交距离的解调结果。结果表明,所提 Sampson 距离解调方法在弱信号条件下的拟合解调误差小于最小二乘法,且解调耗时远低于正交距离。依托激光干涉法自由场校准系统和振动液柱法低频校准系统,分别在 $10\sim 30$ kHz、 20 Hz ~ 2 kHz 频率范围内对光纤水听器解调方法进行了实验对比验证,证明了所提 Sampson 距离解调方法的有效性。

关键词:干涉型光纤水听器;非理想 3×3 耦合器;Sampson 距离;椭圆拟合;弱信号解调

中图分类号: TH74 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

A method for demodulating weak signals in optical fiber hydrophones based on Sampson distance parameter estimation

Liang Qiumin^{1,2}, Wang Min^{2,3}, Yang Ping^{2,3}, Wang Wenxia², Zheng Huifeng¹

(1. College of Metrology Measurement and Instrument, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China; 2. National Institute of Metrology, Beijing 100029, China; 3. Innovation Center for Advanced Traceability Technology, Beijing 102200, China)

Abstract: The interferometric fiber optic hydrophone based on a 3×3 coupler has reached the stage of engineering application in marine target monitoring. Typically, the phase shift signal demodulation employs ellipse fitting based on the least squares method to estimate the parameters of the interference signal, thereby addressing the demodulation bias caused by non-ideal 3×3 couplers. However, when the fiber optic hydrophone receives weak signals and the phase shift generated by the interferometer is small, the Lissajous ellipse formed by the interference signal becomes incomplete. In such cases, the high curvature bias issue of the least squares method leads to significant deviations in the demodulated phase shift signal. Additionally, although the orthogonal distance fitting method can effectively fit incomplete ellipses, its computational complexity and time-consuming nature are unsuitable for real-time demodulation. To address these challenges, this article proposes a weak signal demodulation method for fiber optic hydrophones based on Sampson distance parameter estimation. By utilizing Sampson distance to fit the incomplete Lissajous ellipse formed when the 3×3 coupler fiber optic hydrophone receives weak signals, the parameters of the output interference signal can be accurately estimated. This approach not only improves demodulation accuracy but also significantly enhances computational efficiency, outperforming the orthogonal distance fitting method. Through numerical simulations,

收稿日期: 2024-11-12 Received Date: 2024-11-12

* 基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF0607503)、中央研究院基本科研业务费项目(AKYZZ2413, AKYKF2410)、浙江省属高校基本科研业务费专项资金项目(2023YW89)资助

the demodulation results of Sampson distance, the least squares method, and the orthogonal distance are compared and analyzed. The results show that the proposed Sampson distance demodulation method exhibits smaller fitting and demodulation errors under weak signal conditions compared to the least squares method and requires significantly less computation time than the orthogonal distance method. Experimental comparisons of the fiber optic hydrophone demodulation method are implemented within the frequency ranges of 10 to 30 kHz and 20 Hz to 2 kHz using a laser interferometry free-field calibration system and a vibrating liquid column low-frequency calibration system, respectively. The effectiveness of the proposed Sampson distance demodulation method is validated.

Keywords: interferometric fiber optic hydrophone; non-ideal 3×3 coupler; Sampson distance; ellipse fitting; demodulation of weak signals

0 引 言

光纤水听器是建立在光电技术与光纤技术基础上的一种新型水下声信号传感器^[1]。相较于传统压电水听器,光纤水听器具有灵敏度高、抗电磁干扰能力强、频响范围宽和易于大规模成阵等优点,使其在海洋目标探测监测、水下对抗、海洋资源探测、近海安防等领域获得广泛且重要的应用^[2-5]。

根据声压引起的光波特征参量变化的原理不同,可将光纤水听器分为光栅型、强度型、干涉型以及偏振型,其中干涉型光纤水听器最为成熟,已进入工程化阶段^[6]。干涉型光纤水听器的常用的解调方法包括相位生成载波法(phase generated carrier, PGC)光频外差法和 3×3 耦合器法^[7]。由于 3×3 耦合器法无需载波调制、对激光源要求较低、解调动态范围大,相比于 PGC 法备受青睐^[8]。但其对耦合器的分光比要求较高,由于制作工艺的限制,实际应用中 3×3 耦合器无法保证 3 路信号通道理想对称,导致输出信号相位差偏离 120°且分光比不对称^[9]。

针对上述问题,2002 年 Todd 等^[10]提出了基于 3×3 耦合器的反正切解调方法,该方法无需进行微分或积分运算,仅依赖于反正切运算,结构简单且实现便捷,并通过改进优化,成功消除相位差和分光比的影响。2008 年 Liu 等^[11]提出了椭圆拟合解调方法,该方法利用最小二乘法对 3×3 耦合器任意两路输出信号形成的李萨如图椭圆曲线进行拟合,并估计相关参数,一定程度上能够消除 3×3 耦合器法对耦合器理想化的依赖性。2019 年高晓文等^[12]提出了一种改进的 3×3 耦合器非对称解调方法,利用最小二乘法提取信号参数,后采用微分交叉相乘法解调相移信号,减少了耦合器分光比差异导致的信号畸变。2022 年张令春等^[13]针对解调过程中的电路噪声与相位噪声,提出了局部异常因子优化方法,可有效移除李萨如图中因电路噪声产生的离散点,提高了椭圆拟合解调的准确性。2023 年张硕等^[14]提出了一种幅相非对称修正解调方法,消除了幅度不对称性,并对相位差进行了修正,提高了解调的准确性。

上述基于最小二乘法进行椭圆拟合和参数估计的研究有其局限性。当光纤水听器接收信号较弱、干涉仪产生相移

较小,导致输出干涉信号形成李萨如图椭圆不完整时,最小二乘法椭圆拟合结果存在拟合偏差,影响解调结果的准确性^[15]。正交距离椭圆拟合方法虽然能实现较弱信号解调,但其计算复杂,时间成本高,不利于实现实时解调^[16]。

因此,提出了一种基于 Sampson 距离参数估计的光纤水听器弱信号解调方法,该方法可有效克服光纤水听器输出干涉信号形成李萨如图椭圆不完整导致的拟合不准确的问题,提高解调的准确性,并且计算复杂度大大降低,有利于实现实时解调。仿真对比 Sampson 距离、最小二乘法与正交距离的解调结果,结果表明 Sampson 距离和正交距离均可有效解调光纤水听器所测弱信号,但 Sampson 距离耗时大大减少。依托激光干涉法自由场校准系统与振动液柱法低频校准系统,分别在 10~30 kHz、20 Hz~2 kHz 频率范围内对光纤水听器解调方法进行了实验对比,验证了 Sampson 距离方法的有效性。

1 基于 3×3 耦合器的椭圆拟合解调

基于 Michelson 干涉仪结构设计的 3×3 耦合器光纤水听器如图 1 所示,主要由法拉第旋镜、3×3 耦合器和环形器组成。

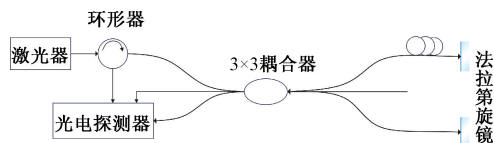


图 1 Michelson 型 3×3 耦合器光纤水听器

Fig. 1 Michelson-type 3×3 coupler optical fiber hydrophone

激光器输出光束经环形器与 3×3 耦合器分成两路,后经旋镜反射产生干涉,最后 3 路干涉信号经光电探测器转换为电信号,可表示为:

$$\begin{cases} V_1 = A_1 + B_1 \cos \varphi(t) \\ V_2 = A_2 + B_2 \cos[\varphi(t) + \varphi_1] \\ V_3 = A_3 + B_3 \cos[\varphi(t) + \varphi_2] \\ \varphi_1 = \frac{2}{3}\pi + \phi_1 \\ \varphi_2 = \frac{4}{3}\pi + \phi_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: A_1, A_2, A_3 为干涉信号的直流分量; B_1, B_2, B_3 为干涉信号的交流分量; $\varphi(t)$ 为待测声信号与环境扰动引起的相位变化; φ_1, φ_2 为 3×3 耦合器输出信号的初始相位差; ϕ_1, ϕ_2 为 3×3 耦合器非对称引入的相位偏差。

由式(1)可知, 光纤水听器输出的任意两路干涉信号存在相位差, 可形成李萨如图。以信号 V_1, V_2 为例, 形成的李萨如图曲线为椭圆, 如图2所示。

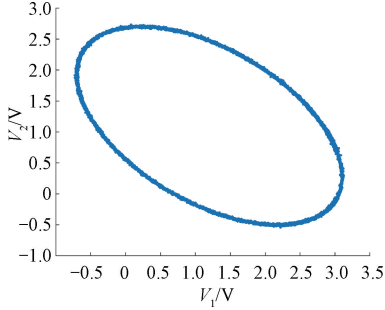


图2 两路输出信号形成的李萨如图

Fig. 2 Lissajous figure formed by the two output signals

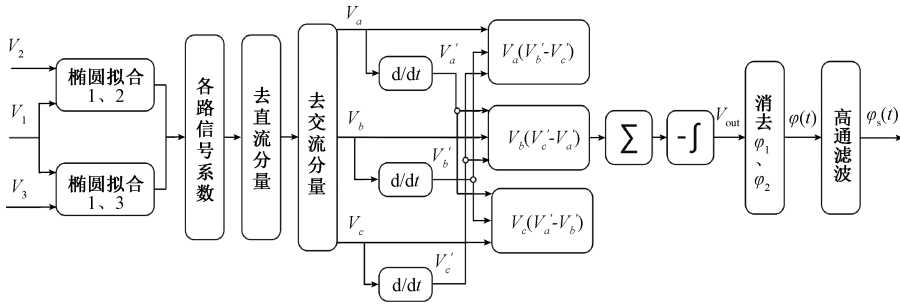


图3 基于椭圆拟合的 3×3 耦合器的解调方法

Fig. 3 Demodulation method for 3×3 couplers based on ellipse fitting

$A_1, A_2, B_1, B_2, \varphi_1$, 即直流分量、交流分量、相位差:

$$\begin{cases} A_1 = \frac{2bc - ad}{a^2 - 4b} \\ A_2 = \frac{2d - ac}{a^2 - 4b} \\ B_1 = \frac{\sqrt{A_1^2 + aA_1A_2 + bA_2^2 - e}}{\sqrt{1 - \frac{a^2}{4b^2}}} \\ B_2 = \sqrt{\frac{B_1^2}{b}} \\ \varphi_1 = \arccos\left(\frac{-a_1B_2}{2B_1}\right) \end{cases} \quad (4)$$

同理联立信号 V_1, V_3 可得 A_3, B_3 和 φ_2 。将椭圆拟合所得 3×3 耦合器各路输出干涉信号参数代入式(1), 消去直流分量 A 和交流分量 B , 然后进行微分交叉相减运算并与另一路相乘, 最后进行相加、积分和取反运算,

V_1, V_2 联立, 消去 $\varphi(t)$ 可得:

$$\begin{aligned} V_1^2 - 2\frac{B_1}{B_2}V_1V_2\cos\varphi_1 + \frac{B_1^2}{B_2^2}V_2^2 + \\ \left[2A_2\frac{B_1}{B_2}\cos\varphi_1 - 2A_1\right]V_1 + \\ \left[2A_1\frac{B_1}{B_2}\cos\varphi_1 - 2A_2\frac{B_1^2}{B_2^2}\right]V_2 + A_1^2 + A_2^2\frac{B_1^2}{B_2^2} - \\ 2A_1A_2\frac{B_1}{B_2}\cos\varphi_1 - B_1^2\sin^2\varphi_1 = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)为椭圆方程表达式, 类比椭圆一般方程可表示为:

$$V_1^2 + aV_1V_2 + bV_2^2 + cV_1 + dV_2 + e = 0 \quad (3)$$

式中: 参数 $a \sim e$ 为待拟合估计量。

基于 3×3 耦合器的椭圆拟合解调方法如图3所示。通过合适的椭圆拟合方法对干涉信号 V_1, V_2 形成的李萨如图椭圆进行拟合, 估计椭圆参数 $a \sim e$, 与 3×3 耦合器输出干涉信号系数对应, 可得式(1)中的各参数

得到:

$$\begin{aligned} V_{\text{out}} = - \int \left[V_a(V'_b - V'_c) + V_b(V'_c - V'_a) + V_c(V'_a - V'_b) \right] dt = \\ [\sin\varphi_1 - \sin\varphi_2 - \sin(\varphi_1 - \varphi_2)]\varphi(t) \end{aligned} \quad (5)$$

最后, 消去式(5)中相位差 φ_1 和 φ_2 , 并经过高通滤波消除低频环境扰动后即可获得解调相移信号 $\varphi_s(t)$ 。

光纤水听器椭圆拟合解调方法关键在于准确拟合估计干涉信号形成的李萨如图椭圆参数。常见的椭圆拟合方法有最小二乘法和正交距离法。最小二乘法的优点是计算简便、效率较高, 但其存在高曲率偏差问题。当椭圆形状不完整时, 其拟合结果存在拟合偏差, 导致解调结果不准确, 如图4所示。

正交距离法在欧几里得空间中的变换是不变的, 避免了高曲率偏差, 但每次迭代需重新估计各点的正交位置, 尤其在数据点较多的情况下, 计算复杂且耗时久, 无法满足光纤水听器工程应用中实时解调的需求。

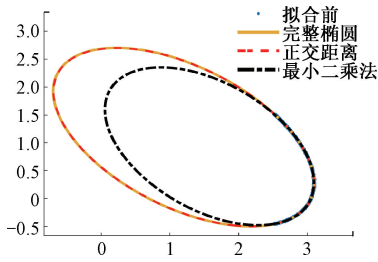


图4 不完整椭圆拟合

Fig. 4 Incomplete elliptical fitting

2 基于 Sampson 距离的光纤水听器信号参数估计

Sampson 距离也称近似最大似然 (approximate maximum likelihood, AML) 距离, 其复杂程度介于代数距离与正交距离之间, 被视为正交距离的一阶近似^[17]。针对目前基于最小二乘法和正交距离的椭圆拟合所存在的问题, 提出基于 Sampson 距离对光纤水听器干涉信号形成的李萨如图椭圆进行拟合, 能够实现不完整椭圆的快速拟合和椭圆参数的准确估计。

一般椭圆方程可表示为:

$$\begin{cases} ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f = 0 \\ 4ac - b^2 > 0 \end{cases} \quad (6)$$

记 $\mathbf{a} = [a, b, c, d, e, f]^T$, $\mathbf{D}(\mathbf{X}) = [x^2, xy, y^2, x, y, 1]^T$,

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 2 \\ 0 & -1 & 0 \\ 2 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \text{则式(6)可表示为:}$$

$$\begin{cases} \mathbf{D}(\mathbf{X})\mathbf{a} = 0 \\ \mathbf{a}^T \mathbf{C} \mathbf{a} > 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{X} = [x, y]$ 为椭圆数据点坐标; $\mathbf{a}$ 为椭圆的系数矢量; $\mathbf{C}$ 为椭圆约束条件的系数矩阵。

Sampson 距离基于代数误差, 并考虑了几何模型在数据点附近的梯度信息, Sampson 距离的公式为:

$$d_{\text{Sampson}} = \frac{|\mathbf{D}(\mathbf{X})\mathbf{a}|}{\sqrt{\left(\frac{\partial \mathbf{D}(\mathbf{X})\mathbf{a}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \mathbf{D}(\mathbf{X})\mathbf{a}}{\partial y}\right)^2}} \quad (8)$$

式中: 分子为点到椭圆的代数距离; 分母为该点处梯度向量的模, 起归一化误差的作用, 使所求误差更接近于实际的几何误差。当数据点接近椭圆曲线时, 梯度方向与正交距离方向接近平行, Sampson 距离即一个近似的正交距离。

在拟合椭圆时, 目标是最小化数据点到椭圆的 Sampson 距离均方误差, 因此 Sampson 距离的代价函数可定义为:

$$\begin{cases} J_{\text{AML}} = \sum_{n=1}^N \frac{\mathbf{a}^T \mathbf{A}_n \mathbf{a}}{\mathbf{a}^T \mathbf{B}_n \mathbf{a}} \\ \mathbf{A}_n = \mathbf{D}(\mathbf{X}_n)^T \mathbf{D}(\mathbf{X}_n) \\ \mathbf{B}_n = \partial_{\mathbf{X}} \mathbf{D}(\mathbf{X}_n)^T \partial_{\mathbf{X}} \mathbf{D}(\mathbf{X}_n) \end{cases} \quad (9)$$

为确保拟合曲线为椭圆, 将约束条件加入代价函数式(9)中, 从而得到 Sampson 距离成本函数, 即:

$$J_{\text{Sampson}} = J_{\text{AML}} + \alpha \frac{\|\mathbf{a}\|^4}{(\mathbf{a}^T \mathbf{C} \mathbf{a})^2} \quad (10)$$

式中: α 为一小正数, 用于权衡约束项的贡献; $\|\mathbf{a}\|$ 为 $\mathbf{a}$ 的欧几里得范数。当拟合曲线接近抛物线, 偏离椭圆时, $\mathbf{a}^T \mathbf{C} \mathbf{a}$ 趋近于 0, 导致约束项无穷大, 从而防止其向非椭圆区域拟合。

观察式(10), 其可用最小二乘的形式表示, 即:

$$\begin{cases} J_{\text{Sampson}} = \mathbf{h}(\mathbf{a}) \times \mathbf{h}(\mathbf{a})^T = \|\mathbf{h}(\mathbf{a})\|^2 \\ \mathbf{h}(\mathbf{a}) = [h_1(\mathbf{a}); h_2(\mathbf{a}); \dots; h_{N+1}(\mathbf{a})] \\ h_n(\mathbf{a}) = \left(\frac{\mathbf{a}^T \mathbf{A}_n \mathbf{a}}{\mathbf{a}^T \mathbf{B}_n \mathbf{a}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad n = 1, \dots, N \\ h_{N+1}(\mathbf{a}) = \alpha^{\frac{1}{2}} \frac{\|\mathbf{a}\|^2}{\mathbf{a}^T \mathbf{C} \mathbf{a}} \end{cases} \quad (11)$$

从式(11)可知, 该问题为非线性最小二乘问题, 可用列文伯格-马夸尔特法进行迭代优化求解。在每次迭代中, 该非线性优化方法参数更新规则为:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\eta} = -(\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{J}^T \mathbf{h}(\mathbf{a}) \\ \mathbf{a}_{k+1} = \mathbf{a}_k + \boldsymbol{\eta}_k \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\boldsymbol{\eta}$ 为更新量; $\mathbf{J}$ 为 $\mathbf{h}(\mathbf{a})$ 的雅可比矩阵, 通过求解式(13)可得; $\mathbf{I}$ 为 6×6 单位阵; 初始值 $\mathbf{a}$ 可通过最小二乘法拟合得到; λ 为调整因子, 成本下降时, 减小 λ , 使其接近高斯-牛顿法, 从而加快收敛速度, 成本增加时, 增大 λ , 以获得梯度下降法的稳定性。

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_n(\mathbf{a})}{\partial \mathbf{a}} \\ \frac{\partial h_{N+1}(\mathbf{a})}{\partial \mathbf{a}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\mathbf{a}}{h_n(\mathbf{a})} \left(\frac{\mathbf{A}_n}{\mathbf{a}^T \mathbf{B}_n \mathbf{a}} - \frac{\mathbf{a}^T \mathbf{A}_n \mathbf{a}}{(\mathbf{a}^T \mathbf{B}_n \mathbf{a})^2} \mathbf{B}_n \right) \\ 2\alpha^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\mathbf{I}}{\mathbf{a}^T \mathbf{C} \mathbf{a}} - \frac{\|\mathbf{a}\|^2}{(\mathbf{a}^T \mathbf{C} \mathbf{a})^2} \mathbf{C} \right) \mathbf{a} \end{bmatrix} \quad (13)$$

通过多次迭代求解式(11)的极小值并归一化, 即可获得最佳的椭圆参数。后续通过式(4)可计算出光纤水听器输出干涉信号的相关系数, 从而完成光纤水听器相移信号的解调。

3 数值仿真与结果分析

为验证基于 Sampson 距离参数估计的 3×3 耦合器椭圆拟合解调方法对弱信号解调的性能, 通过数值仿真对基于最小二乘法、正交距离和 Sampson 距离的解调结果

进行了对比分析,干涉信号设置为:

$$\begin{cases} V_1 = A_1 + B_1 \cos[\varphi(t) + \varphi_n(t)] + n(t) \\ V_2 = A_2 + B_2 \cos[\varphi(t) + \varphi_1 + \varphi_n(t)] + n(t) \\ V_3 = A_3 + B_3 \cos[\varphi(t) + \varphi_2 + \varphi_n(t)] + n(t) \end{cases}$$

(14)

式中: $\varphi(t) = C\cos(2\pi ft)$ 为待解调信号, C 为相位幅值, f 为信号频率; $\varphi_n(t)$ 为相位噪声,与 3×3 耦合器性能有关; $n(t) = n_w(t) + n_{1/f}(t)$ 为噪声扰动,其中 $n_w(t)$ 为高斯白噪声, $n_{1/f}(t)$ 为粉红噪声,分别模拟光电探测器热噪声与解调系统电路低频干扰。

3.1 仿真 1:强信号条件下的仿真和对比

当被测水声信号较强时,根据式(14)设置信号参数,干涉仪 3 路信号直流分量 A_1 、 A_2 、 A_3 分别为 0.54、0.52、0.50;交流分量 B_1 、 B_2 、 B_3 分别为 0.62、0.65、0.63;相位差 φ_1 、 φ_2 分别为 117° 、 243° ;待解调信号频率 f 为 15 kHz,幅值 C 为 3 rad;相位噪声 $\varphi_n(t)$ 为 0.3 rad;噪声扰动 $n(t)$ 由信噪比均为 45 dB 的白噪声与粉红噪声组成;信号数据点数为 10 k。 3×3 耦合器的仿真信号如图 5 所示。

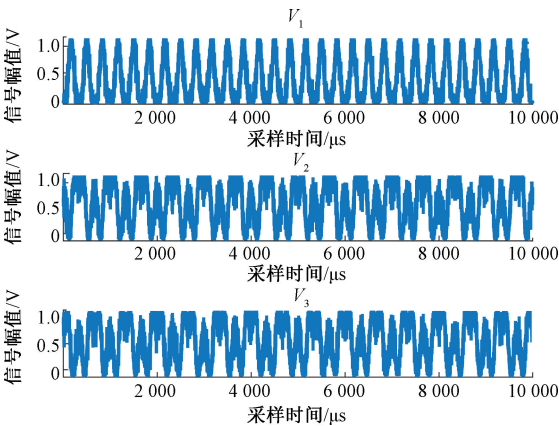
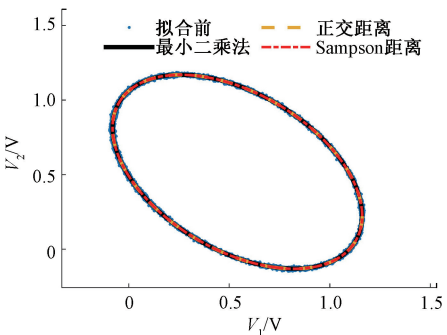


图 5 3×3 耦合器输出信号仿真图

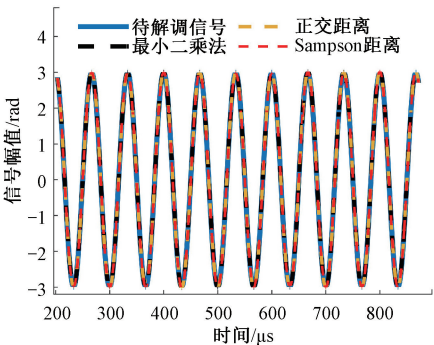
Fig. 5 Simulation diagram of the output signal from a 3×3 coupler

依据解调方法, 3×3 耦合器输出的 3 路干涉信号两两组合形成李萨如图,利用 3 种不同解调方法对其进行椭圆拟合。其中,信号 V_1 和 V_2 形成的李萨如图拟合结果如图 6(a) 所示,李萨如图椭圆完整,3 种方法拟合所得椭圆曲线一致。解调结果对比图如图 6(b) 所示,3 种方法的解调结果均与待解调信号吻合良好。

表 1 具体给出了 3 种解调方法的数值结果对比。可以看到,3 种方法解调幅值与仿真预设值(3 rad)的偏差均 $<0.2\%$ 。其中,最小二乘法最为简便, Sampson 距离的拟合过程耗时稍长,但远小于正交距离。表明 3 种方法都适用于强信号条件下光纤水听器输出相移的准确解



(a) 李萨如图椭圆拟合图
(a) Lissajous ellipse fitting diagram



(b) 解调结果对比
(b) Comparison of demodulation results

图 6 强信号条件下解调结果

Fig. 6 Demodulation results under strong signal conditions

调,且最小二乘法的计算效率最高, Sampson 距离方法次之。

表 1 不同参数估计方法解调结果

Table 1 Demodulation results using different parameter estimation methods			
参数估计方法	最小二乘法	正交距离	Sampson 距离
仿真值/rad	3.000 0	3.000 0	3.000 0
解调值/rad	3.003 1	3.003 1	3.003 1
偏差/%	0.103 3	0.103 3	0.103 3
耗时/s	0.008 6	9.218 9	0.324 8

3.2 仿真 2:弱信号条件下的仿真和对比

当被测水声信号较弱时,设置其他条件与上述仿真 1 相同,减小待解调信号幅值 C 为 0.8 rad,相位噪声 $\varphi_n(t)$ 为 0.08 rad,信号 V_1 和 V_2 形成的李萨如图拟合结果如图 7(a) 所示,李萨如图椭圆不完整,最小二乘法的椭圆拟合曲线长轴偏小,拟合结果存在偏差; Sampson 距离与正交距离的椭圆拟合曲线一致。解调结果对比图如图 7(b) 所示,最小二乘法的解调信号偏大,明显偏离待解调信号,而 Sampson 距离与正交距离的解调信号与待解调信号吻合良好。

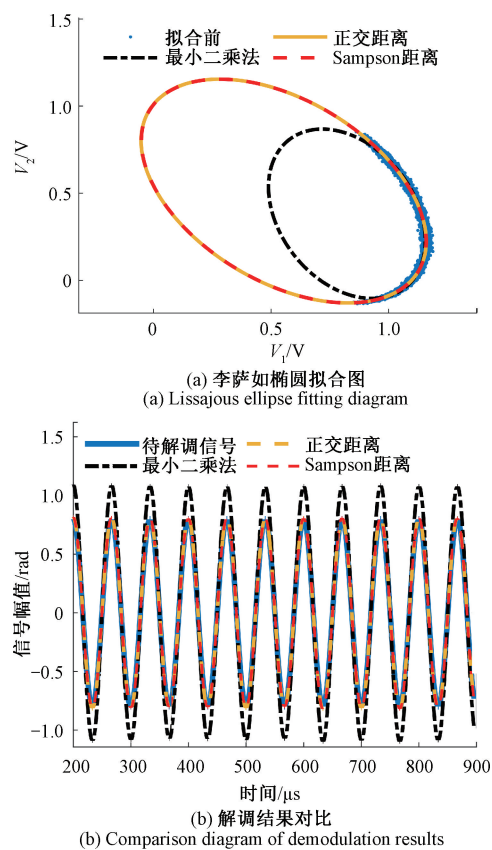


图 7 弱信号条件下解调结果

Fig. 7 Demodulation results under weak signal conditions

表 2 具体给出了 3 种解调方法的数值结果对比,最小二乘法的解调信号幅值为 1.082 1 rad,明显大于待解调信号幅值 0.8 rad。而正交距离和 Sampson 距离的解调信号幅值与待解调信号的偏差均<1%,但 Sampson 距离的耗时远小于正交距离。表明 Sampson 距离方法可实现弱信号解调,且解调效率得到了显著提高。

表 2 不同参数估计方法解调结果

参数估计方法	最小二乘法	正交距离	Sampson 距离
仿真值/rad	0.800 0	0.800 0	0.800 0
解调值/rad	1.082 1	0.807 0	0.807 4
偏差/%	35.263 0	0.925 0	0.875 0
耗时/s	0.011 2	15.261 6	0.820 4

3.3 仿真 3:不同频率条件下的仿真和对比

为验证不同频率下 Sampson 距离方法的有效性,在 10 Hz~35 kHz 范围内对不同频率输入信号进行仿真对比,其他条件与仿真 2 相同,3 种解调方法的幅值误差与

耗时结果如图 8 所示。可以看到,Sampson 距离的解调信号幅值误差与正交距离的基本一致,均<1.5%,而最小二乘法的解调幅值误差超过 32%;在相同处理器条件下,最小二乘法的最大耗时为 0.011 2 s,正交距离的最大耗时为 24.151 3 s,而 Sampson 距离的最大耗时为 0.823 9 s。上述结果表明,Sampson 距离与正交距离都适用于不同频率下的弱信号解调,但 Sampson 距离方法在解调效率上有显著提升。

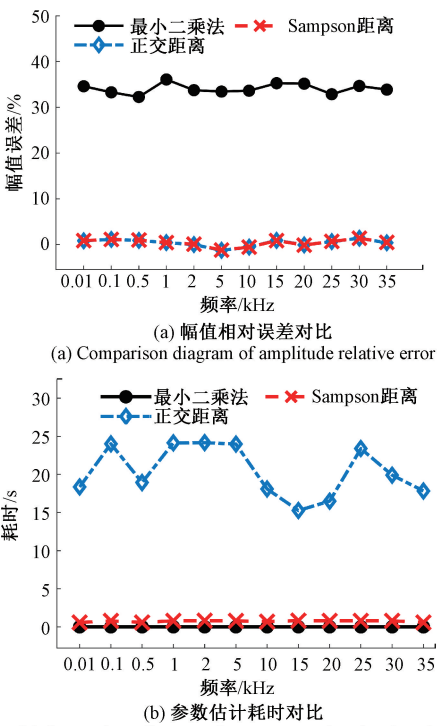


图 8 不同频率条件下的结果对比
Fig. 8 Comparison diagram of results under different frequency conditions

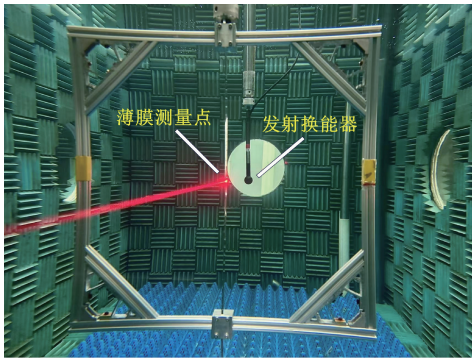
4 光纤水听器解调与校准实验验证

在上述仿真分析的基础上,搭建了光纤水听器激光干涉法自由场中高频校准系统与振动液柱法低频校准系统,分别在 10~30 kHz、20 Hz~2 kHz 频率范围内对光纤水听器解调方法进行了实验验证和对比分析。

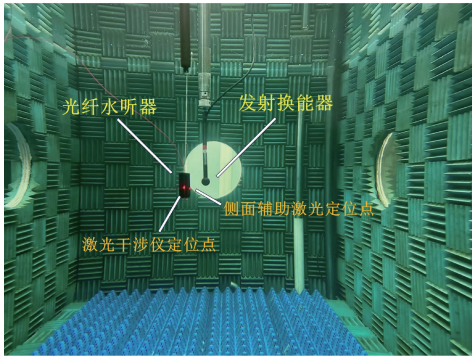
4.1 解调与校准系统

1) 激光干涉法自由场中高频校准系统

实验系统的实物图如图 9 所示,实验所依托的消声水槽尺寸为 3 m×2 m×2 m,开设有光学窗口;声源采用工作频率为 1~60 kHz 的球形发射换能器;光纤水听器灵敏度>-150 dB,动态范围>120 dB@1 kHz;激光干涉仪为 Polytec 公司的 OFV-505/5000,用于测量薄膜在水声场中的振动速度;透声反光薄膜采用宽度为 4 mm、厚度为 20 μm 的镀铝聚酯薄膜。



(a) 水中声压测量实验布置
(a) Experimental setup for underwater acoustic pressure measurement



(b) 光纤水听器测量实验布置
(b) Experimental setup for optical fiber hydrophone measurement

图 9 激光干涉法校准系统

Fig. 9 Calibration system of the laser interferometry method

光纤水听器相移解调系统如图 10 所示,激光光源为 RIO 公司生产的窄线宽、低噪声激光器,其线宽 < 3 kHz;光电探测器的带宽为 500 kHz;光纤环形器采用工作波长为 1 550 nm、传播方向损耗低于 0.55 dB 的三端口环形器。

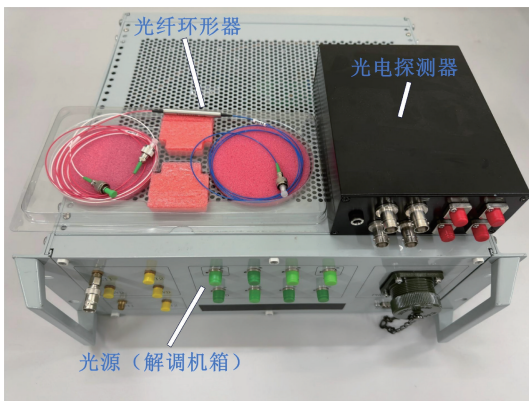


图 10 光纤水听器相移解调系统

Fig. 10 Phase-shift demodulation system for optical fiber hydrophones

在激光干涉仪测量声压的过程中,应使测量光束与框架内薄膜的中心点、及球形发射换能器的中心位于同一水平面且共线,薄膜反射光束沿原路返回至激光干涉仪。同时,在水槽侧壁设置用于定位的辅助激光器,其发射光束与激光干涉仪的测量光束水平相交于薄膜测量点,以标记后续光纤水听器的测量位置,保证薄膜测量点与光纤水听器的测量点一致。通过测量该点薄膜的振动速度,计算对应的声压值^[18]。

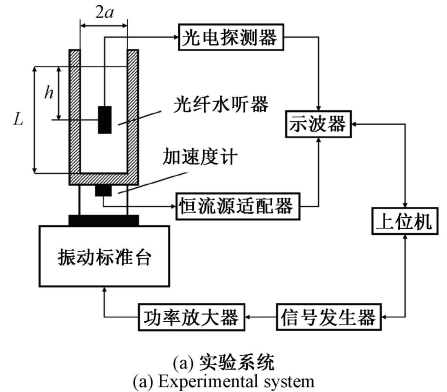
若激光干涉法测量所得的振速幅值为 u , 那么光纤水听器的相移灵敏度计算公式可表示为:

$$M_{\phi} = \frac{e_{\phi}}{p} = \frac{e_{\phi}}{\rho c u} \quad (15)$$

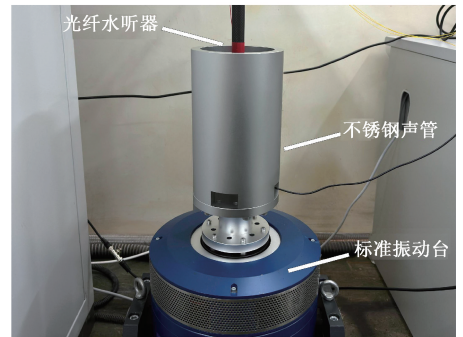
式中: M_{ϕ} 为光纤水听器相移灵敏度; e_{ϕ} 为光纤水听器干涉光相移量; p 为测量点声压; ρ 为水介质的密度; c 为水介质中的声速。

2) 振动液柱法低频校准系统

实验系统如图 11 所示,振动液柱法属于阻抗校准法,通过获取待测水听器输出开路电压和加速度传感器输出开路电压计算待测水听器的灵敏度^[19]。



(a) 实验系统
(a) Experimental system



(b) 振动液柱装置
(b) The vibrating liquid column device

图 11 振动液柱法校准系统

Fig. 11 Calibration system of the vibrating liquid column method

光纤水听器的相移灵敏度可表示为:

$$M_{\phi} = \frac{e_{\phi}}{p(h)} = \frac{e_{\phi}}{e_a} \cdot \frac{S_{ea}}{\rho h} \left(\frac{kh \cos kL}{\sin kh} \right) \quad (16)$$

式中： $p(h)$ 为入水深度为 h 处的声压； e_a 为加速度计开路电压； S_{ea} 为其电压灵敏度； L 为声管中液柱高度； h 为光纤水听器入水深度； ρ 、 k 分别为水的密度和波数。

4.2 实验结果与分析

分别在 10~30 kHz、20 Hz~2 kHz 频率范围对干涉型光纤水听器进行了基于最小二乘法、正交距离与 Sampson 距离的 3×3 耦合器解调实验,对比分析了 3 种解调方法的解调效果,具体结果与讨论为:

1) 10~30 kHz 自由场实验结果与分析

以 15 kHz 为例,示波器采样点数设置为 10 k。设置信号发生器输出峰峰值为 250 mV_{pp} 的正弦脉冲信号,通过功率放大器激励发射换能器产生声波信号。光纤水听器受声信号调制,输出干涉信号 V_1 、 V_3 所形成李萨如图拟合结果如图 12(a) 所示,解调结果如图 12(b) 所示。

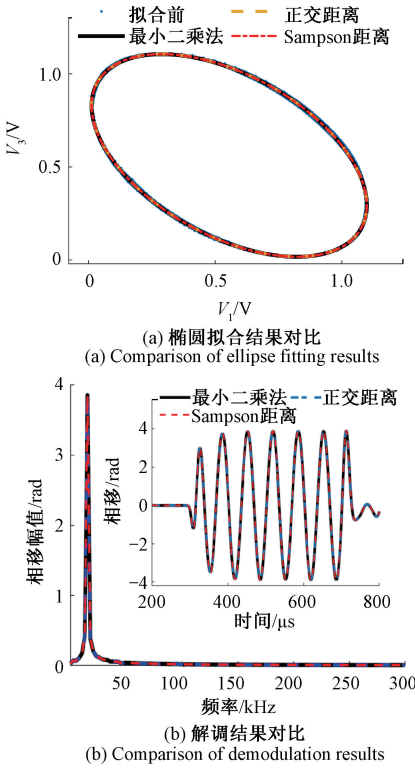


图 12 光纤水听器解调结果

Fig. 12 Demodulation results for optical fiber hydrophones

从图 12(a) 可以看到,3 种解调方法椭圆拟合曲线重合。从 12(b) 的时域图可以看出,解调所得相移信号为良好的正弦信号,相移幅值基本一致,对应频域图中并未出现谐波分量。其中,最小二乘法的解调相移幅值为 3.899 2 rad,耗时 0.004 3 s;正交距离的相移幅值为 3.898 2 rad,耗时 7.620 4 s;Sampson 距离的相移幅值为 3.898 3 rad,耗时 0.212 8 s。在强信号条件下,3 种方法解调所得的相移信号一致。其中,最小二乘法耗时最短,Sampson 距离次之,耗时均远少于正交距离。

通过激光干涉法测量作用于光纤水听器上的声压量值,输出振速信号如图 13 所示。

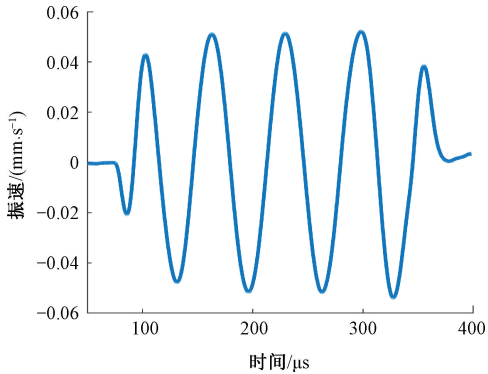


图 13 激光解调振速信号结果

Fig. 13 Laser-demodulated vibration velocity signal results

改变信号发生器输出信号的峰峰值为 40 mV_{pp},其他条件不变,椭圆拟合结果如图 14(a) 所示,解调结果如图 14(b) 所示。

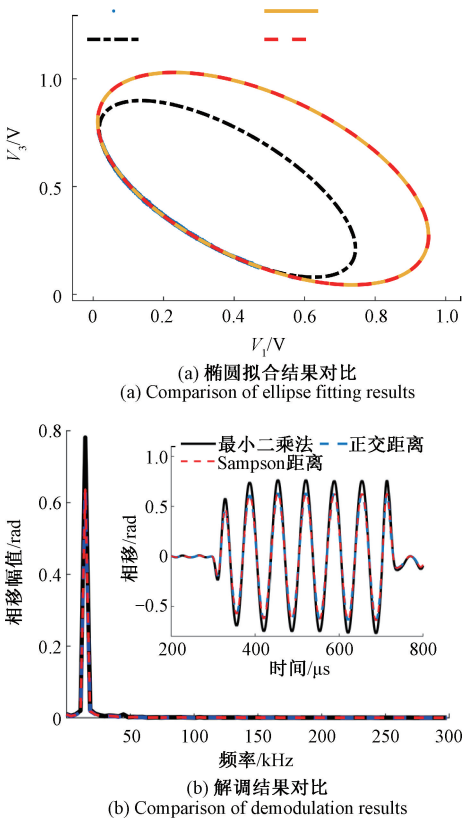


图 14 光纤水听器解调结果

Fig. 14 Demodulation results for optical fiber hydrophones

从图 14(a) 可以看到,干涉信号形成的李萨如图椭圆不完整,最小二乘法拟合曲线与其他两种方法存在偏差。图 14(b) 中,最小二乘法的解调相移幅值为 0.788 0 rad,耗时

0.001 6 s; 正交距离的相移幅值为 0.619 9 rad, 耗时 12.752 8 s; Sampson 距离的相移幅值为 0.620 1 rad, 耗时 0.333 8 s。相较于其他两种方法, 最小二乘法解调所得相移信号偏大。Sampson 距离解调所得的相移信号与正交距离的一致, 但解调效率远高于正交距离。

激光干涉仪输出振速信号如图 15 所示。

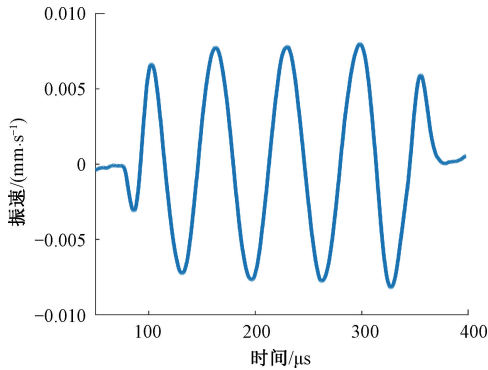


图 15 激光解调振速信号结果

Fig. 15 Diagram of laser-demodulated vibration velocity signal results

利用光纤水听器的相移灵敏度参考值(注:参考值来源于通过国家计量标准考核的水声声压标准装置, 测量不确定度为 1.2 dB), 及解调所得相移值, 参考式(15)计算可得光纤水听器所测位置的声压值, 并与激光干涉法实测声压值进行对比, 验证解调算法的准确性, 声压测量与对比结果如表 3 所示。

表 3 15 kHz 光纤水听器测量声压对比

Table 3 Comparison of the measured sound pressure by the 15 kHz fiber optic hydrophone

信号幅值/ mVpp	最小二乘法/ Pa	正交距离/ Pa	Sampson 距离/Pa	实测声压/ Pa
250	73.44	73.42	73.43	76.92
40	14.84	11.68	11.68	11.59

从表 3 可以看出, 强信号条件下, 3 种解调方法所得声压值与激光干涉法实测声压值的偏差较小, 最大偏差为 3.5 Pa, 相对误差为 4.6%; 弱信号条件下, 最小二乘法所得声压值与实测值偏差为 3.25 Pa, 相对误差为 28%, 远大于灵敏度参考值测量不确定度(1.2 dB)对应的相对误差(14%), 而正交距离和 Sampson 距离所得声压值与实测值最大偏差为 0.09 Pa, 相对误差为 0.78%。

进一步地, 给出了 15 kHz 不同信号源激励下的解调结果, 如图 16 所示。可以看到, 3 种解调方法在较宽的信号激励范围内具有良好线性度, 在解调信号的相移 > 1.2 rad 时, 解调结果一致。当相移 < 1.2 rad 时, 最小二

乘法的解调结果偏离了线性, 而 Sampson 距离与正交距离在相移 < 1.2 rad 时仍能解调, 但当相移 < 0.6 rad 时, 两者均偏离线性, 最小可解调相移为 0.6 rad。

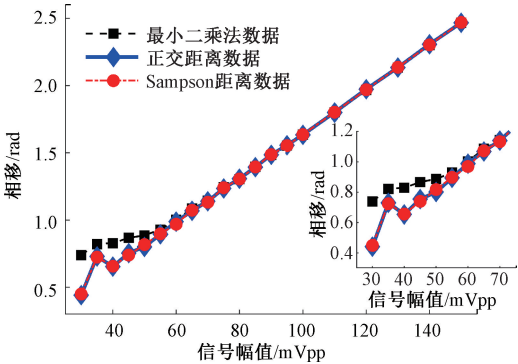
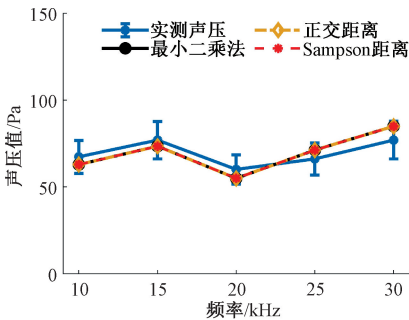


图 16 15 kHz 不同信号源激励下的解调结果

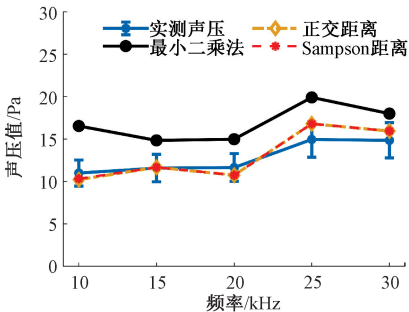
Fig. 16 Demodulation results under different signal source excitations at 15 kHz

最后, 在 10~30 kHz 频率范围, 分别在强、弱信号条件下对光纤水听器进行解调和校准实验。对比 3 种解调方法所得声压值与激光干涉法实测的声压值, 结果如图 17 所示, 图中以灵敏度参考值测量不确定度(1.2 dB)对应的相对误差(14%)作为误差棒。



(a) 强信号结果对比

(a) Comparison of results under strong signal conditions



(b) 弱信号结果对比

(b) Comparison of results under strong signal conditions

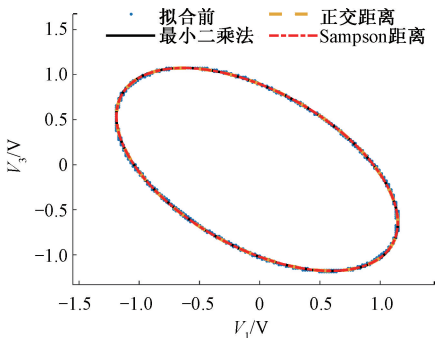
图 17 声压值对比

Fig. 17 Comparison diagram of sound pressure values

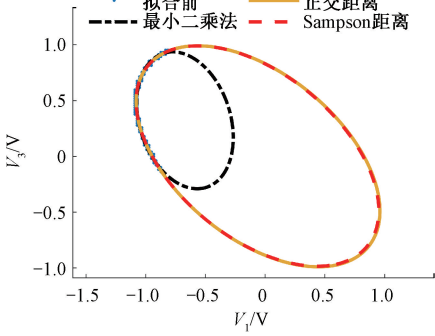
从图 17 中可以看到, 强信号条件下, 3 种方法所得声压值基本相同, 最大相对误差为 10.35%, 均在实测声

压误差范围内;弱信号条件下,最小二乘法所得声压值与实测声压值偏差较大,最大相对误差超过 50%,远大于灵敏度参考值测量不确定度对应的误差范围,而 Sampson 距离和正交距离的灵敏度估计声压与实测声压的最大相对误差为 12.42%,表明 Sampson 距离方法在弱信号解调方面具有明显优势。

2) 20 Hz~2 kHz 振动液柱法低频实验结果与分析
为验证 Sampson 距离方法在低频段的有效性,通过振动液柱法低频校准系统进行了实验测试。以 20 Hz 为例,示波器采样点数设置为 10 k。设置信号发生器输出峰峰值分别为 30 与 5 mVpp 的正弦信号。光纤水听器输出干涉信号形成的李萨如椭圆拟合结果见图 18,解调结果见图 19,声压值对比结果见表 4。



(a) 30 mVpp椭圆拟合结果
(a) Ellipse fitting results for 30 mVpp



(b) 5 mVpp椭圆拟合结果
(b) Ellipse fitting results for 5 mVpp

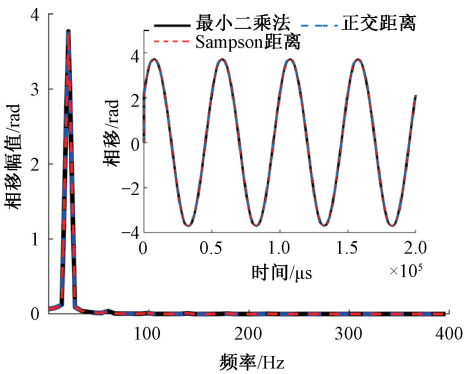
图 18 椭圆拟合结果对比

Fig. 18 Comparison diagram of ellipse fitting results

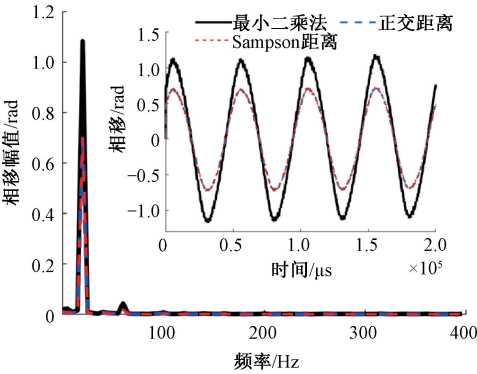
表 4 20 Hz 光纤水听器测量声压对比

Table 4 Comparison of the measured sound pressure by the 20 Hz fiber optic hydrophone

信号源幅值/ mVpp	最小二乘法/ Pa	正交距离/ Pa	Sampson 距离/Pa	实测声压/ Pa
30	53.72	53.76	53.76	55.34
5	15.45	9.83	9.81	10.12



(a) 30 mVpp解调结果
(a) Demodulation results for 30 mVpp



(b) 5 mVpp解调结果
(b) Demodulation results for 5 mVpp

图 19 光纤水听器解调结果

Fig. 19 Demodulation results for optical fiber hydrophones

从上述结果可以得出与高频段类似的结果:强信号条件下,3 种方法的解调结果一致,光纤水听器所得声压与振动液柱法实测声压的相对误差最大为 2.9%;弱信号条件下,最小二乘法无法准确拟合椭圆,导致解调的相移信号明显偏大,所得声压值与实测声压值相对误差为 52.67%,而 Sampson 距离与正交距离所得声压值与实测声压相对误差最大为 2.87%。

进一步地,给出了 20 Hz 不同信号源激励下的解调结果,如图 20 所示。

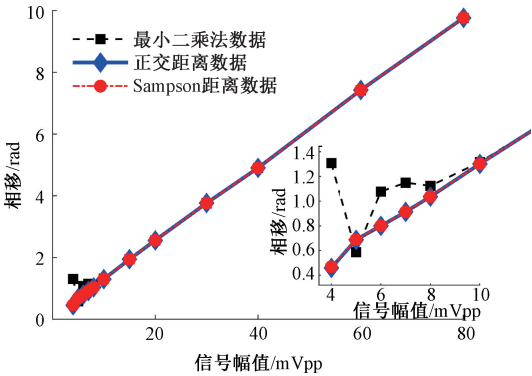


图 20 20 Hz 不同信号源激励下的解调结果

Fig. 20 Demodulation results under different signal source excitations at 20 Hz

与高频段基本一致,解调结果在较宽的信号激励范围内具有良好线性度,最小二乘法最小可解调相移为 1.2 rad ,Sampson距离与正交距离最小可解调相移为 0.6 rad 。实验结果表明,Sampson距离方法具有良好的适用性。理论上,所提解调方法可测信号的动态范围下限主要受所拟合椭圆不完整性及曲率的影响;而动态范围上限主要受信号采样率的限制,通过适当增大信号采样率能够满足强信号解调。

最后,在 $20\text{ Hz}\sim 2\text{ kHz}$ 频率范围,分别在强、弱信号条件下对光纤水听器进行解调和校准实验,对比3种解调方法灵敏度参考值估计声压与振动液柱法实测的声压,结果如图21所示。

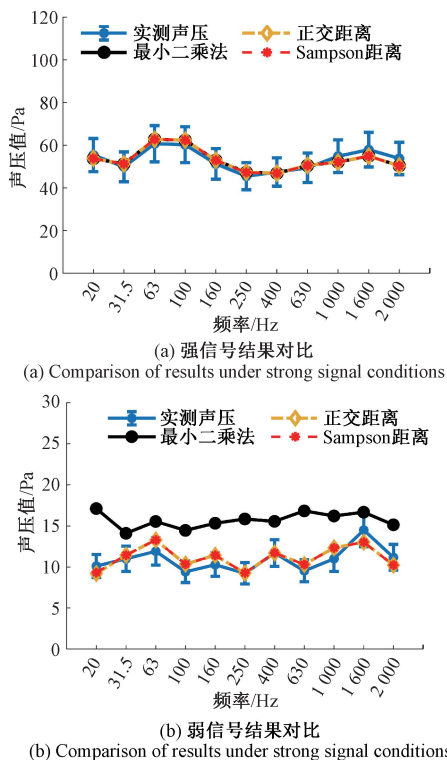


图21 声压值对比

Fig. 21 Comparison sound pressure values

与高频段结果类似,强信号条件下3种方法均能获得与实测声压一致的结果;弱信号条件下,最小二乘法所得声压与实测声压的偏差很大,最大相对误差超过60%,Sampson距离方法所得声压值与实测声压值相对误差较小,均在实测声压的误差范围内(14%),表明Sampson距离方法适用于不同频率条件下弱信号的准确解调。

5 结 论

针对现有基于最小二乘法的椭圆拟合方法无法在弱信号条件下准确拟合干涉信号形成李萨如图,以及基于

正交距离的椭圆拟合解调方法计算复杂、难以满足实时解调的问题,提出了一种基于Sampson距离参数估计的光纤水听器弱信号解调方法。通过与传统椭圆拟合方法在不同频段的对比验证,仿真与实验结果表明,该方法不仅适用于光纤水听器强信号条件下的准确解调,在弱信号条件下同样具有良好性能。相比最小二乘法,该方法具有更高的拟合解调准确度;相比正交距离,其拟合解调耗时更低。这拓展了光纤水听器在弱信号实时测量和感知中的应用范围,有助于进一步提高光纤水听器对水下弱信号目标的探测与识别能力。

参考文献

- [1] 苑立波,童维军,江山,等.我国光纤传感技术发展路线图[J].光学学报,2022,42(1):9-42.
YUAN L B, TONG W J, JINAG SH, et al. Road map of fiber optic sensor technology in China[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(1): 9-42.
- [2] 郑来芳,张俊生,梁海坚,等.一种光纤振动传感器的改进型相位解调方法研究[J].电子测量与仪器学报,2021,35(8):184-190.
ZHENG L F, ZHANG J SH, LIANG H J, et al. Improved phase demodulation method for fiber optic vibration sensor[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(8): 184-190.
- [3] 柯尊灵,王芳,陈震.光纤水听器相位解调中的数值组合处理方法[J].光纤与电缆及其应用技术,2023(2):30-34,41.
KE Z L, WANG F, CHEN ZH. Numerical combination processing method in phase demodulation of fiber-optic hydrophone[J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 2023(2): 30-34,41.
- [4] 王宇,郭柴旺,王俊虹,等. Φ -OTDR系统非对称光纤耦合器相位解调方法研究[J].电子测量与仪器学报,2023,37(1):149-156.
WANG Y, GUO CH W, WANG J H, et al. Study on phase demodulation method of asymmetric optical fiber coupler in Φ -OTDR system[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(1): 149-156.
- [5] 侯庆凯,姚琼,陈虎,等.一种提高光纤水听器解调系统噪声传递系数稳定性的多相相位生成载波解调算法[J].光学学报,2024,44(2):143-151.
HOU Q K, YAO Q, CHEN H, et al. A multi-phase phase generated carrier demodulation algorithm for stability improvement of noise transfer coefficient for fiber

- optic hydrophone [J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(2): 143-151.
- [6] 郭银景, 王蕾, 苏铭玥, 等. 光纤水听器解调技术研究进展[J]. *光谱学与光谱分析*, 2022, 42(4): 1017-1021.
- GUO Y J, WANG L, SU M Y, et al. A review of demodulation technology of fiber optic hydrophone[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2022, 42(4): 1017-1021.
- [7] 王彦, 蒋超, 朱伟, 等. 基于 Lissajous 输出拟合的非平衡 M-Z 干涉仪相位解调[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(2): 84-92.
- WANG Y, JIANG CH, ZHU W, et al. Phase demodulation of unbalanced M-Z interferometer based on Lissajous output fitting[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(2): 84-92.
- [8] 梁楸岷, 王敏, 王文侠, 等. 干涉型光纤水听器信号解调算法研究进展[J]. *计量科学与技术*, 2023, 67(11): 17-23, 78.
- LIANG Q M, WANG M, WANG W X, et al. Research progress on interferometric fiber optic hydrophone signal demodulation algorithm [J]. *Metrology Science and Technology*, 2023, 67(11): 17-23, 78.
- [9] 孔明阳, 樊融, 初凤红, 等. 基于 3×3 耦合器的分布反馈激光器振动传感解调算法[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(21): 9113-9121.
- KONG M Y, FAN R, CHU F H, et al. Demodulation algorithm of distributed feedback laser vibration sensor based on 3×3 coupler [J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(21): 9113-9121.
- [10] TODD M D, SEAYER M, BUCHOLTZ F. Improved, operationally-passive interferometric demodulation method using 3×3 coupler [J]. *Electronics Letters*, 2002, 38(15): 784-786.
- [11] LIU T T, CUI J, CHEN D SH, et al. A new demodulation technique for optical fiber interferometric sensors with 3×3 directional couplers[J]. *Chinese Optics Letters*, 2008, 6(1): 16-19.
- [12] 高晓文, 张自丽, 叶博, 等. 一种改进的光纤水听器 3×3 耦合器解调算法 [J]. *声学 & 电子工程*, 2019(3): 15-19.
- GAO X W, ZHANG Z L, YE B, et al. An improved optical fiber hydrophone 3×3 coupler demodulation algorithm [J]. *Acoustics and Electronic Engineering*, 2019(3): 15-19.
- [13] 张令春, 姜海明, 张俊喜, 等. 局部异常因子优化的椭圆拟合算法及其在光纤振动传感相位解调中的应用[J]. *物理学报*, 2022, 71(19): 180-187.
- ZHANG L CH, JIANG H M, ZHANG J X, et al. Phase demodulation of fiber vibration sensing by modified ellipse fitting algorithm based on local outlier factor optimization[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(19): 180-187.
- [14] 张硕, 王敏, 王珂, 等. 针对 3×3 耦合器幅相非对称的光纤水听器解调方法[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(2): 32-41.
- ZHANG SH, WANG M, WANG K, et al. Correction for signal demodulation of fiber optic hydrophone with asymmetric amplitude and phase of 3×3 coupler [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(2): 32-41.
- [15] 鲍海宇, 郭振翔, 钱进, 等. 基于混合 Kalman 椭圆拟合的移相干涉测量算法 [J]. *应用光学*, 2024, 45(6): 1228-1237.
- BAO H Y, GUO ZH X, QIAN J, et al. Phase-shifting interferometry algorithm based on hybrid Kalman ellipse fitting[J]. *Journal of Applied Optics*, 2024, 45(6): 1228-1237.
- [16] 邹益民, 汪渤. 一种基于最小二乘的不完整椭圆拟合算法[J]. *仪器仪表学报*, 2006(7): 808-812.
- ZOU Y M, WANG B. Fragmental ellipse fitting based on least square algorithm[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006(7): 808-812.
- [17] SAMPSON P D. Fitting conic sections to “very scattered” data: An iterative refinement of the bookstein algorithm[J]. *Computer Graphics and Image Processing*, 1982, 18(1): 97-108.
- [18] 王敏, 杨平, 何龙标, 等. 10~500 kHz 水听器的激光外差干涉法原级校准[J]. *声学学报*, 2021, 46(4): 614-622.
- WANG M, YANG P, HE L B, et al. Primary calibration of hydrophones in the frequency range 10 to 500 kHz using a heterodyne interferometer [J]. *Acta Acustica*, 2021, 46(4): 614-622.
- [19] 解建宇, 王月兵, 赵鹏, 等. 振动液柱管中不同尺度水听器灵敏度补偿方法 [J]. *计量学报*, 2024, 45(4): 565-572.

XIE J Y, WANG Y B, ZHAO P, et al. Sensitivity compensation method for hydrophones with different scales in vibrating liquid column tube[J]. Acta Metrologica Sinica, 2024, 45(4): 565-572.

作者简介



梁楸岷,2022 年于中国计量大学获得学士学位,现为中国计量大学硕士研究生,主要研究方向为水声计量、光纤水听器信号处理。

E-mail:qiumin_liang@123.com

Liang Qiumin received his B. Sc. degree from China Jiliang University in 2022. He is currently a master student at China Jiliang University. His main research interests include underwater acoustic metrology and signal processing of fiber optic hydrophones.



王敏(通信作者),2010 年于北京邮电大学获得学士学位,2016 年于中国科学院大学(中国科学院声学研究所)获得博士学位,现为中国计量科学研究院副研究员,主要研究方向为水声计量、声学信号处理等。

E-mail:wangmin@nim.ac.cn

Wang Min (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Beijing University of Posts and Telecommunications in 2010, and received his Ph. D. degree from University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences) in 2016. He is currently an associate research fellow at National Institute of Metrology. His main research interests include underwater acoustic metrology and acoustic signal processing.